高速工具サーボによる大面積正弦波微細格子基準面の高精度創成* (格子基準面ローカル領域の高精度化)

田 野 誠^{*1}, 高 偉^{*2}
荒 木 武^{*3}, 清 野 慧^{*2}

High-accuracy Fabrication of a Sinusoidal Grid Surface Over a Large Area by Fast Tool Servo (Improvement of Fabrication Accuracy in Local Areas of the Grid Surface)

Makoto TANO, Wei GAO^{*4},
Takeshi ARAKI and Satoshi KIYONO

^{*4} Department of Nanomechanics, Tohoku University,
6-6-01 Aramaki Aza Aoba, Aoba-ku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

This paper describes a diamond turning fabrication system for a sinusoidal grid surface, which is a superposition of periodic sinusoidal waves along the X- and Y-directions. The wavelength and amplitude of the sinusoidal wave in each direction are 100 μm and 100 nm, respectively. The fabrication system, based on fast-tool-servo (FTS), has the ability to generate the angle grid surface over an area of $\phi 150\text{ mm}$. This paper focuses on the improvement of the fabrication accuracy in local areas. Each of these areas is approximately 1 mm $\times$ 1 mm, which can be imaged by an interference microscope. Specific fabrication errors, caused by the round nose geometry of the diamond cutting tool and the data digitization, for the manufacturing process are successfully identified by Discrete Fourier Transform of the microscope images. Compensation processes are carried out to achieve a reduction of the errors. As a result, the fabrication errors in local areas of the angle grid surface are reduced to 1/10.

Key Words: Measurement, Accuracy, Ultra-precision Machining, Sinusoidal Surface, Fast Tool Servo

1. 緒 言

本研究では多自由度位置検出用サーフェスエンコーダ^①の計測基準面である角度格子の高精度化を目的とする。サーフェスエンコーダは角度格子と二次元角度センサで構成される。図 1 に示される角度格子は XY 方向にそれぞれ独立した正弦波成分を持っており、その形状は次式で表される。

$$f(x, y) = a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) + a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} y\right) \dots\dots\dots (1)$$

ここで a および λ はそれぞれ角度格子の振幅および波長である。

角度格子と対向して配置される 2 次元角度センサで X と Y 方向の角度形状成分を分離検出することで、角度格子及び角度センサ間の相対的移動の XY 2 次元の位置検出を行うことができる。1 つのセンサで多自由度検出が可能であることから計測系のコンパクト化や簡略化が期待できる。

サーフェスエンコーダの実用化に向けて大きな課題となっているのが、計測基準である角度格子の製作である。角度格子は XY 方向に正弦波を重ね合わせた形状を持つ鏡面体であり、その波長と振幅は形状を読み取

Fig. 1 Schematic of the angle grid

* 原稿受付 2005 年 3 月 22 日。

^{*1} 東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01)。

^{*2} 正員、東北大学工学研究科。

^{*3} (株)日立ディスプレイズ (〒101-0022 東京都千代田区神田練堀町 3)。

E-mail: gaowei@cc.mech.tohoku.ac.jp

る角度センサの仕様にに基づきそれぞれ 100 μm オーダ、100 nm オーダと設計されている。角度格子の形状誤差は位置・姿勢検出の精度に大きく影響する。また、精密ステージの位置決めなどのサーフェスエンコーダの適用対象を考慮すると、角度格子形状を $\phi 100$ mm オーダの範囲に渡って高い精度で創成することが必要となる。

筆者らは角度格子の製作に超精密旋盤と高速工具サーボ(FTS)⁹を用いたシングルポイントダイヤモンド切削加工法を採用し、自作した FTS を用いて、超精密旋盤のスペックで決まる $\phi 150$ mm の範囲に渡って角度格子形状が創成できる加工システムを構築した⁹。シングルポイントダイヤモンド切削加工は工具と工作物の相対運動軌跡がその速度に依存せず非常に正確に加工表面形状に転写されるという性質を持つので、精密な加工面が迅速に得られる¹⁰。加えて、高速工具サーボの技術を用い、工具を工作物に対して三次元的に精密かつ高速に運動制御し切込み量を加工面上のすべての点に対して独立に与えることによって、三次元微細形状を高い形状精度と表面粗さで創成することが可能である。

サーフェスエンコーダで目標とする位置検出分解能および精度はそれぞれ 10 nm、100 nm である。それに合わせて角度格子形状は XY 面内ではサブミクロン、Z 高さ方向ではナノメートルオーダの形状精度が必要となる。本論文ではまず 1 mm 四方のローカル領域における角度格子の高精度創成を目指して、角度格子の形状評価手法を確立し誤差要因を詳細に分析する。そして、その結果を基に補正加工を行い、ローカル領域での形状の高精度化を図る。

2. 加工システム

図 2 に本研究で構築した加工システムの概略図を示す。図に示すように主軸回転中心を原点とする直交座標 XYZ を設定する。工具台を X 軸に沿って送り、工作物を取り付けた主軸を回転させると、XY 平面上にらせん状の相対運動軌跡を描く。その相対運動軌跡に沿って Z 方向に高速に切込み量を変化させることで、加工面に任意の 3 次元微細形状が創成する。本システムにおいては工具台が主軸回転に同期して移動するので、主軸の回転角のみを検出するだけで工具と工作物の相対位置を知ることができる。主軸の回転角検出にはロータリーエンコーダを使用する。ロータリーエンコーダの分割数が P、主軸回転速度が T rpm、工具送り速度が F mm/min であるとする、加工開始か

Fig. 2 Fabrication system for the angle grid

ら i 番目のパルス出力時の工具位置は、工作物の中心を原点とする極座標 (r_i, θ_i) を用いて

$$(r_i, \theta_i) = \left(r_0 - \frac{Fi}{PT}, 2\pi \frac{i}{P} \right) \quad i = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

と表される。ここで r_0 はワーク半径、 N は加工終了までの総パルス数である。 $z=f(x,y)$ で表される三次元形状を加工する場合、 i 番目のパルス出力時の切込み量 $z(i)$ は、

$$z(i) = f\left(r_i \cos \theta_i, r_i \sin \theta_i\right) = f\left(\left(r_0 - \frac{Fi}{PT}\right) \cos \left(2\pi \frac{i}{P}\right), \left(r_0 - \frac{Fi}{PT}\right) \sin \left(2\pi \frac{i}{P}\right)\right) \quad (3)$$

により求められる。加工時においてパルスが出力される度に切込み量を計算しては主軸の回転に対して処理が追いつかないため、予め $z(i)$ を計算して PC 内のメモリに蓄えておくことで、高速に切込み量を制御できる。また、ワーク材質アルミ合金 A5052、ロータリーエンコーダ分割数 30,000 P、回転速度 20 rpm、工具送り量 5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ 、加工範囲 $\phi 150$ mm の条件で加工を行った。

3. 評価方法

3.1 評価領域

角度格子の仕様とその目標形状精度を考慮すると、形状測定装置に求められる分解能は高さ方向 1 nm、横方向 100 nm 程度であることから白色干渉顕微鏡 (Zygo 社製 NewView100) を用いる。しかし、測定範囲が 1 mm 四方程度と小さく、超精密旋盤で加工できる最大の直径 $\phi 150$ mm 全面に渡って角度格子形状を評価する場合、非常に多い測定回数が必要で非効率的である。

ここで、超精密旋盤を用いて加工していることに着

目すると、工具軌跡は図 3 に示すようならせん状の軌跡を描くので、範囲 A, B, C...で工具の通り方は同じである。仮に範囲 A においてある性質の誤差が存在すると、領域 B, C...においても同じ性質の誤差が存在すると推測される。したがって、代表範囲 A の評価をすることで面全体の誤差の性質を把握する方法が効果的である。さらに範囲 A を半径方向にも均等に 0 から 7 の 8 領域に分けてそれぞれ評価を行う。

3. 2 評価手法

角度格子は正弦波から構成されるので、フーリエ変換と非常に相性が良い。このフーリエ変換を 2 次元的に行うことによって、3 次元形状の評価が可能となる。図 4, 5 にそれぞれ干渉顕微鏡による評価領域 7 の測定結果とそのスペクトル分布図を示す。 f_x, f_y はそれぞれ XY 方向形状成分の空間周波数を示し、 $m(f_x, f_y)$ は成分の振幅を対数で表している。スペクトル分布図において X 方向と Y 方向の角度格子に対応する空間周波数に現れるピークが理想形状成分によるもので、その他のピークは誤差成分によるものと考えられる。さらにそのピークは空間周波数や大きさだけではなく、方向の情報も有するため誤差要因を特定するのに有効な情報を含む。本研究で使用する干渉顕微鏡の仕様から、測定可能な最大の空間周波数は $0.22 \text{ 1/}\mu\text{m}$ 、つまり最小波長 $4.6 \mu\text{m}$ 成分までである。また測定可能な最大波長は 1 mm である。

Fig. 3 Evaluation areas

Fig. 4 Interference microscope image of the angle grid in Area 7

4. 誤差の考察

4. 1 工具コーナ半径 R による誤差

図 5 に見られる f_x, f_y 両軸の $0.01 \text{ 1/}\mu\text{m}$ にある計 4 本のピークが波長 $100 \mu\text{m}$ の正弦波成分すなわち角度格子形状成分を示している。 f_x 方向において形状成分の 2 倍の空間周波数 $0.02 \text{ 1/}\mu\text{m}$ に誤差成分によるピークが見られる。図は省略するが、この誤差はワークの全評価領域において同じ場所に現れていることが確認された。各評価領域における誤差成分の大きさを表 1 に示す。以下にこの誤差の原因についての考察を述べる。この誤差の特徴はすべての評価領域において工具の送り方向である f_x 方向に形状成分の半分の波長で現れていることである。角度格子形状をそのまま工具切込み量として加工データを作成すると、図 6 に示すように工具コーナ半径 R の分だけ加工点にずれが生じて余分に削り取られる部分が形状誤差となる。正弦波の頂上と谷底においては傾きが 0 となるため、この誤差は生じず、誤差成分の波長が形状の半分となる。その確認のシミュレーション結果を図 7 に示す。 $\lambda_{\text{tool}}=50 \mu\text{m}$ の誤差成分が確認でき、形状スペクトルの誤差成分が工具コーナ半径 R による加工点のずれが原因で生じている

Fig. 5 Spectrum distribution of the surface profile in Fig. 4

Table 1 Errors caused by the round nose geometry

Evaluation area	1	2	3	4	5	6	7
Workpiece radius r_a mm	10	20	30	40	50	60	70
Error nm	7.8	9.5	9.5	10.4	10.2	11.5	13.2

Fig. 6 Compensation of the profile error caused by the round nose geometry

Fig. 7 Simulation result of the profile error caused by the tool round nose geometry

ことが示された。また、誤差の波長については工具コーナ半径 R の変化に依存せず一定となるが、振幅については R に比例して増大することがシミュレーションより確認された。

加工した角度格子の誤差スペクトルの平均値は 10.3 nm であり、シミュレーション結果の 9.3 nm に対して大きくなっているが、これは角度格子形状を創成するために使用される工具エッジ部における局所コーナ半径 R' が公称値 R と異なっているためと考えられる。図 6 の Δx が角度格子を加工する際に使用されるエッジ部で、角度格子の波長を λ 、振幅を a 、工具コーナ半径を R として幾何学計算より、(4)式のように求められる。

$$\Delta x = \frac{2R}{\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi a}\right)^2}} \quad (4)$$

ここで、 $\lambda=100 \mu\text{m}$ 、 $a=0.1 \mu\text{m}$ 、 $R=1000 \mu\text{m}$ であるから、角度格子の加工に使用されるエッジ部は $\Delta x=13 \mu\text{m}$

となり、非常に微小であることがわかる。したがって、エッジ部の局所工具コーナ半径 R' が公称半径 R と異なることが予想される。

加工に使用されるエッジ部での局所工具コーナ半径 R' を求める方法を以下に示す。公称値近くのいくつかの値で補正された加工データを作成して角度格子を加工し、2次元フーリエ変換の結果から角度格子を創成するのに使用される工具領域における局所工具コーナ半径を導出する。得られた局所工具コーナ半径を用いて補正加工を行うことで、公称半径と局所コーナ半径の違いにより生じる誤差を減少させることができる。また、ワーク半径 r が大きい場所において f_x が工具送り方向、 f_y が切削方向と見なせるため、工具コーナ半径による誤差が正確に評価できる。ただし、中心部の領域 0 においては、工具送り方向が半径方向に相当し、コーナ半径による誤差が全方向に分散するため、評価に用いることができない。

上記の方法により局所工具コーナ半径 R' を導出した結果を図 8 に示す。なお、摩耗の影響による変化も確認するため、4.8 km 切削を行った後に再び局所工具コーナ半径 R' の導出を行った結果も付記する。角度格子の加工ではワーク直径 $\phi 150 \text{ mm}$ 、 $5 \mu\text{m/rev}$ で送るので切削距離は 3.5 km となる。前加工の平面加工の切削距離 1.5 km と角度格子加工時の中間地点における切削距離 1.75 km を現段階での切削距離に加え、切削距離 8.0 km における摩耗量を予測し、局所工具コーナ半径を 1.85 mm として加工データの補正を行った。

4. 2 加工データ離散化による誤差

図 5 からわかるように、 f_x 軸上にも誤差成分が確認される。各評価領域における誤差成分の大きさおよび空間周波数をプロットしたグラフを図 9 に示す。その傾向としては外周部にいくほど、誤差成分が大きくなる

Fig. 8 Determination result of the local radius used for compensation

Fig. 9 Measurement result of the error caused by digitization

Fig. 10 Simulation result of the error caused by digitization

つ空間周波数が低くなることが確認された。\$f_y\$ 軸は評価領域において切削方向（円周の接線方向）に対応していることから、この誤差は切削方向における高速工具サーボの工具切込み量制御点間隔、つまり形状データの離散化が原因であると考えられる。すなわち、ロータリーエンコーダ分割数が一定であるため、外周部に行くほど切削方向における制御点間隔は粗くなり、空間周波数が低くかつ振幅が大きな誤差となる。

確認のためにシミュレーションを行った。FTS のモデル化はカットオフ周波数の実測値 2.3 kHz を用いて一次遅れ要素として扱った。シミュレーション結果において誤差成分とその空間周波数をプロットしたものを図 10 に示す。誤差成分の大きさに違いが見られるが、実測値と同様の挙動を示していることが確認された。

データ離散化による誤差の補正は、単純にロータリーエンコーダの分割数を増やし、制御点間隔をより細かくすることで解決することが考えられる。しかし、FTS の帯域の制限から加工データ出力が DA ボードの出力周波数に追いつかないことが予想される。DA ボードの出力周波数の問題についてはスピンドルの回転速度を減速すれば解決するが、加工時間の増大をもたらす。したがって、出力周波数や回転数等を考慮して加工条件を見直す必要があり、以下にそれについて述べる。

$T(r)$: スピンドル回転数(rpm)

P : ロータリーエンコーダ分割数(P/rev)

t_p : トラックピッチ($\mu\text{m}/\text{rev}$)

r : ワーク上での半径位置(μm)

とすると、

$V = 2\pi r T$: 周速(rpm)

$F_s = \frac{PT}{60}$: 形状データ出力周波数(Hz)

$L_s = \frac{2\pi}{P}$: 周方向形状データ出力間隔(μm)

$F_{FTS} = \frac{2\pi T}{60\lambda}$: 高速工具サーボの動作周波数(Hz)

$D_p = \frac{Pr_{\max}}{t_p}$: 総データ点数(P)

が求まる。主な制約条件は、

$T < 167$: ロータリーエンコーダの応答限界

$P < 180000$: ロータリーエンコーダの分割数

$F_{FTS} < 1600$: 高速工具サーボの応答限界

となる。改善前の加工条件を、 r を横軸にとり、 T , P , L_s をプロットしたものを図 11 に示す。この条件では、最外周部において $L_s = 15.7 \mu\text{m}$ であり、角度格子の波長 $100 \mu\text{m}$ を 6 分割するのみである。トラックピッチ t_p つまり工具送り方向の制御分解能と同じ $L_s = 5 \mu\text{m}$ にするためには、ロータリーエンコーダの分割数を 3 倍に増やせば良い。しかし、その場合は加工データ出力周波数が大きくなってしまふ。そこで、データ出力システムにおける最大トリガ周波数を調べた上でより適した加工条件を設定することにする。そのためのデータ出力システムのエラー検査を以下の方法で行った。0, 1, 0, 1, 0... という矩形波状の加工データを作成し、トリガ周波数の変化によるデータの出力状態を調べる。トリガ周波数が限界値を超えた場合、0, 1, 0, 0, 1... のような出力の抜けが起こる。この出力の抜けをデジタルオシロスコープ(Hewlett-Packard, 54645A)の Glitch trigger 機能を用いて検出した。10 分間連続で検査を行った結果、120 kHz 以下においては抜けがまったく起きないことが確認された。

新しい加工条件では $P = 90000$ P とロータリーエンコーダ分割数を 3 倍大きくし、これにより最外周部において $L_s = 5.2 \mu\text{m}$ 、角度格子の波長を 20 分割する程度の制御分解能を得ている。また、20 mm より大きいワーク半径方向位置において $T = 1500 \times 10^3 \text{ rpm}$ とスピンドル回転数を半径方向位置に反比例するようにして最大 80 rpm まで使用しており、この T により加工時間は従来の半分の 6.6 時間を達成できる。さらには周速一定加工となるので、同じ切削条件での加工が行える。また、20 mm 以内で 80 rpm 一定としているのは最大トリガ周波数 120 kHz の制限によるものである。図 12 に変更後の加

工条件を示す。

4. 3 補正加工

上記の補正および加工条件の見直しを行った後に再加工実験を行った。加工後に 2 次元フーリエ変換により評価を行った。各領域の工具コーナ半径による誤差およびデータ離散化による誤差をプロットしたものを図 13 に示す。工具コーナ半径による f_x 軸方向最大誤差は補正前の 132 nm から 1.5 nm まで、データ離散化による f_y 軸方向最大誤差は 1 nm から 0.1 nm 以下まで減少できていることが確認された。

Fig. 11 Fabrication condition before modification

Fig. 12 Fabrication condition after modification

Fig. 13 Analysis result with modified fabrication condition

5. 結 言

高速工具サーボと超精密旋盤を用いた加工システムを構築し、加工実験を行った。ローカル領域の角度格子形状の高精度化を図るために 2 次元フーリエ変換による角度格子の形状誤差評価手法を確立した。形状誤差の解析より工具コーナ半径による加工誤差とデータ離散化による加工誤差が存在することが確認された。工具コーナ半径による誤差は局所コーナ半径を求めて補正することにより、またデータ離散化による誤差を加工条件の適正化によりそれぞれ一桁低減することができた。

加工機の真直度誤差などを計測、補正することによって、角度格子全面にわたるグローバル領域の平面度を向上させることなどが今後の課題となる。

謝 辞

本研究は科研費基盤研究(S)を受けて行ったことを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) S. Kiyono, P. Cai and W. Gao, An angle-based position detection method for precision machines, *JSME Int. J.*, **42-1**, (1999), 44-48.
- (2) 高偉, 星野唯, 清水裕樹, 清野慧, マルチスポット光源を用いたサーフェスエンコーダの研究, *精密工学会誌*, **68**, 1, (2002), 70-74.
- (3) 岡崎祐一, ダイヤモンド旋削による微小表面形状の創成, *真空*, **40**, 6, (1997), 541-545.
- (4) W. Gao, T. Araki, S. Kiyono, Y. Okazaki, M. Yamanaka, Precision nano-fabrication and evaluation of a large area sinusoidal grid surface for a surface encoder, *Precision Engineering* **27**, (2003), 289-298.
- (5) 前田真児, 竹内芳美, 沢田潔, 河合知彦, 佐田登志夫, 非回転工具による多焦点マイクロフレネルレンズ加工, *精密工学会誌*, **67**, 9, (2001), 1463-1467.
- (6) 岩田一明, 森脇俊道, 奥田孝一, 銅の超精密ダイヤモンド切削における切削温度の解析, *精密工学会誌*, **53**, 8, (1987), 113-118.
- (7) 井川直哉, 島田尚一, R. R. Donaldson, C. K. Syn, J. S. Taylor, 大森義市, 田中宏明, 吉永博俊, 極微小切削における切りくず形態と最小切取り厚さ, *精密工学会誌*, **59**, 4, 141-147.